



ARTÍCULO

Efecto de diferentes dosis de radiación gamma en una plantación recién establecida de *Eucalyptus nitens* en la Región del Biobío.

Patricio Rojas Vergara^{1*}; Jorge Gonzalez Campos²; María Molina Brand²; Laura Koch Zúñiga²; Tamara Vera Castro²; Ethel Velásquez Opazo³; Daniel Villegas Nassar³; Doris Ly Muñoz³; Eulogio de la Cruz Torres⁴ & Josefina González Jimenez⁴.

¹ Instituto Forestal, sede Metropolitana. patricio.rojas@infor.cl

² Instituto Forestal, sede Biobío

³ Comisión Chilena de Energía Nuclear

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México.

* Autor para correspondencia.

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.581>

Recibido: 23.12.2022; Aceptado 31.3.2023

RESUMEN

La aplicación de bajas dosis de radiación gamma conocida como “hórmesis” tiene efectos metabólicos y fisiológicos de corto plazo en las plantas, que en algunas experiencias ha permitido aumentar la germinación de las semillas, el enraizamiento de las estacas y el crecimiento inicial de las plantas. Existiría además una relación con efectos epigenéticos que se manifestarían como respuestas adaptativas en las especies irradiadas. Para dilucidar la magnitud de los efectos de hórmesis se irradió semillas de *Eucalyptus nitens* con dosis de 0, 10, 20 y 30 Gy de radiación gamma, la semilla se viverizó y las plantas obtenidas se establecieron en un ensayo en terreno (agosto, 2021). En este trabajo se presentan los resultados de la primera evaluación de este ensayo, después de una temporada de crecimiento en terreno, y se discute respecto de la existencia de efecto de las dosis de irradiación sobre el crecimiento inicial de plantas de *E. nitens* en condiciones de plantación forestal.

Palabras clave: radiación gamma, hórmesis, mejoramiento genético forestal

SUMMARY

The application of low doses of gamma radiation known as "hormesis" has short-term metabolic and physiological effects on plants, which in some experiences has increased seed germination, rooting of cuttings and initial plant growth. There would also be a relationship with epigenetic effects that would manifest as adaptive responses in irradiated species. To elucidate the magnitude of the effects of hormesis, seeds of *Eucalyptus nitens* were irradiated with doses of 0, 10, 20 and 30 Gy of gamma radiation, the seed was nursed and the plants obtained were established in a field trial (August, 2021). This paper presents the results of the first evaluation of this trial, after one growing season in field, and discusses the existence of an effect of irradiation doses on the initial growth of eucalyptus nitens plants under forest plantation conditions.

Keywords: gamma radiation, hormesis, forest tree breeding

INTRODUCCIÓN

Esta investigación está en el marco del programa de Cooperación Técnica FAO/IAEA CHI5052 “Utilización de técnicas nucleares para mejorar la adaptación y la productividad de las especies forestales que se enfrentan el cambio climático” desarrollada por INFOR y CCHEN como contrapartes.

Es bien sabido de las aplicaciones de la energía nuclear con fines médicos, industriales, agrícolas y la generación de energía eléctrica y térmica. También se conoce que la radiación ionizante es una forma de

crear variabilidad genética que no existe en la naturaleza o que no está disponible para el mejorador de plantas. Por lo tanto, existen muchos trabajos destinados a determinar la mejor dosis de radiación a aplicar en labores de fitomejoramiento.

El sector forestal en Chile es el tercero en la economía nacional después de la minería y los productos agroalimentarios. En este sector las plantaciones de eucalipto (principalmente *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*) constituyen las de más rápido crecimiento y mayor interés industrial para la producción de celulosa. Las mejores procedencias de estas especies como Jeeralang y Toorong Plateau (Victoria Central, Australia) pueden alcanzar productividades entre 20 y 40 m³/ha/año en edades de rotación de 10 a 12 años, sin mejoramiento genético.

Sin embargo, como consecuencia del cambio climático, en los últimos diez años se ha observado una ostensible disminución de las precipitaciones en la zona centro sur de Chile, afectando el crecimiento y la productividad de *E. globulus* y el aumento de la susceptibilidad al ataque de insectos (*Gonipterus*, *Ophelimus*, *Phoracanta*, *Tenarytaina*) y hongos (*Mycosphaerella*, *Botriosphaeria*), lo que ha generado una merma significativa de la productividad en volumen (m³/ha) y rendimiento pulpable de las plantaciones (ADT/ha).

Las potenciales aplicaciones de las tecnologías nucleares podrían tener gran importancia en el nuevo escenario de cambio climático que está afectando la adaptabilidad de las especies nativas y exóticas en nuestro país. Según referencias bibliográficas las aplicaciones de bajas dosis de radiación gamma en plantas conocida como “hórmesis” generan alteraciones metabólicas y fisiológicas en las plantas, como el aumento de la germinación en las semillas y crecimiento inicial de las plantas. En este contexto, se evalúa el efecto hormético en un ensayo de plantación de *E. nitens*, establecido con plantas obtenidas a partir de las semillas irradiadas con distintas dosis de radiación gamma (10, 20 y 30 Gy) y semillas testigo sin irradiar.

Como hipótesis se plantea que las plantas cuyas semillas fueron irradiadas, experimentarán diferencias de crecimiento (diámetro de cuello, altura) respecto a las plantas controles. Estas diferencias podrían constituir una ventaja de crecimiento o desarrollo inicial para las plantas provenientes de semilla irradiada.

MATERIAL Y MÉTODO

Se evalúa un ensayo de *Eucalyptus nitens* después de su primera temporada de crecimiento en terreno, compuesto por plantas obtenidas a partir de semillas sometidas a distintos grados de irradiación con rayos gamma. La irradiación de las semillas se efectuó en dependencias de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). La producción de plantas se efectuó en el vivero del Centro Tecnológico de la Planta Forestal, del Instituto Forestal, sede Biobío. El ensayo se plantó con la tecnología silvícola operacional usada por Forestal Mininco para el establecimiento de plantaciones (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Tecnologías de viverización y silvicultura de establecimiento del ensayo.

Actividad	Información
Viverización	-Fecha de siembra: 2020. -Sustrato: Corteza de pino compostada G-12. -Contenedor: bandejas de 88 cavidades de 103 cc c/u -Tipo de reproducción: semillas irradiadas con 10, 20, 30 Gy de radiación gamma, más un control sin irradiar.
Plantación	-Tratamiento de desechos:2021, arrumado en cancha. -Preparación de suelo: subsolado con bulldozer + rastra. -Fecha de Plantación: 10 de agosto de 2021. -Técnica: manual - pala neozelandesa. -Fertilización: Al establecimiento, en el hoyo de plantación con 30 g/planta de fertilizante encapsulado Agroblen)

Ensayo Evaluado

El ensayo se estableció en agosto de 2021, en un suelo de trumao en la pre cordillera de la Región del Biobío, en el predio Quilleco (Lote B, Rodal 2021) de patrimonio de Forestal Mininco S.A., ubicado aproximadamente a 15 Km al suroeste de Quilleco en las coordenadas UTM N 5845379 - E 768783, a 375 msnm (**Figuras 1 y 2**). El entorno corresponde a plantaciones comerciales de *Pinus radiata*, y quebradas constituidas principalmente por bosque nativo de *Nothofagus spp.* Predomina el clima templado cálido lluvioso, con influencia mediterránea (Cfsb). Las temperaturas máximas y mínimas fluctúan entre 28,7 °C (enero) y 3,4 °C (julio), con una precipitación media de 1.393 mm/año, un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 693 mm/año, y un período húmedo de 5 meses, en los que se produce un excedente hídrico de 700 mm.

El ensayo cuenta con un diseño experimental de bloques al azar (**Figura 3**). Considera 4 bloques completos, en cada uno de los cuales se prueban 4 tratamientos, correspondientes a las dosis de irradiación aplicadas a las semillas que originaron las plantas usadas en el ensayo (0, 10, 20 y 30 Gy de radiación gamma). En cada bloque los tratamientos están representados por parcelas rectangulares de 32 plantas distribuidas en un arreglo de 8x4 plantas, con un espaciamiento de 3,5x2 m (equivalente a 1.429 pl/ha). En total contempla 512 plantas (32 pl/trat X 4 trat/bq X 4 bq/ensayo) y una superficie efectiva de 0,36 ha (512 pl X 7m²/pl).

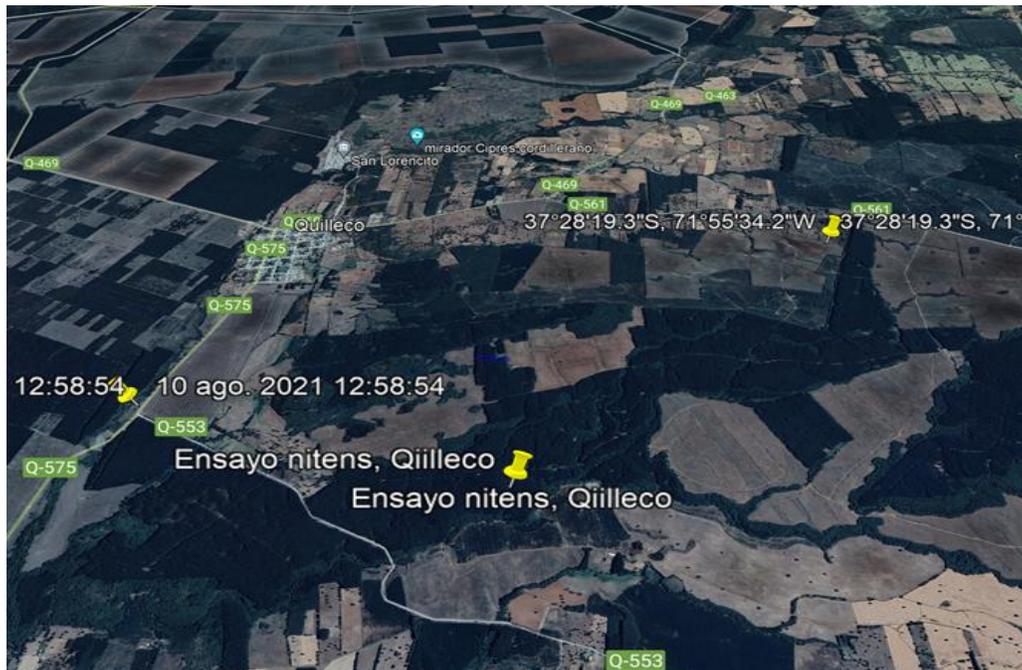


Figura 1. Localización geográfica del ensayo

Mediciones

A los 10 meses post-plantación se realizó la medición de las plantas del ensayo (**Figura 4**), registrándose para cada una de ellas sus valores de altura (H) y diámetro de cuello (DAC), con estos se calculó el indicador volumen teórico DAC^2H . Durante la medición también se registró el estado sanitario (daño por heladas), usando una escala cualitativa de 5 niveles (**Cuadro 2**).



Figura 4. Medición de la altura del ensayo

Cuadro 2. Escala cualitativa para caracterizar el estado sanitario (daño por heladas)

Categoría de daño	Descripción	Codificación
Sano	Sin daño aparente	1
Leve	<25% de planta dañada	2
Medio	>25% - <50% de la planta dañada	3
Alto	>50% de la planta dañada	4
Muerto	Planta muerta	5

13 meses después de la plantación, se registró el contenido de clorofila foliar con un medidor de Clorofila SPAD-502 plus (Konica Minolta). El contenido foliar de clorofila de plantas, es un parámetro que sirve para determinar el estado nutricional de las plantas (Cunha *et al.*, 2015). Los valores SPAD modelan la cantidad relativa de clorofila presente midiendo la absorbancia de la hoja en dos regiones de longitud de onda. La clorofila tiene picos de absorbancia en las regiones azul (400-500 nm) y roja (600-700 nm), sin absorbancia en la región del infrarrojo cercano, el medidor de Clorofila SPAD-502 plus usa estas dos absorbancias, para calcular un valor SPAD numérico que es proporcional a la cantidad de clorofila presente en la hoja.

Para la obtención de lecturas de SPAD, se seleccionó diez plantas por tratamiento en cada bloque (n=160, a las cuales se les colectó tres hojas por estrato (estrato superior, medio e inferior). Previo a la

toma de lecturas, el equipo fue calibrado utilizando el calibrador suministrado por el fabricante. Las mediciones fueron realizadas en el envés de cada hoja, específicamente en la lámina foliar, evitando la nervadura.

Las variables morfológicas (H, DAC) y bioquímicas (SPAD), se evaluaron mediante la prueba paramétrica Análisis de Varianza o ANOVA, utilizando como factores las dosis (tratamientos) y los bloques del ensayo. Para cada variable se evaluó los supuestos de Normalidad de sus residuos, mediante la prueba de Shapiro Wilk ($\alpha = 0,05$). Además, se midió el supuesto de Homocedasticidad mediante la prueba de Bartlett ($\alpha = 0,05$). Para las variables que no cumplan los supuestos se reemplazó la prueba ANOVA por la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. Una vez determinado que existen diferencias entre las medias de las poblaciones para cada una de las variables morfológicas, se utilizó la prueba post hoc LSD de Fisher ($\alpha = 0,05$), para evaluar cuales poblaciones presenta diferencias significativas.

Para la variable categórica estado sanitario (daño por heladas), considerando que se midió en una escala ordinal, no aplican las pruebas paramétricas, por lo que se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) para examinar las diferencias según las dosis de radiación aplicadas al material.

Todas las pruebas estadísticas y, los gráficos se realizaron utilizando el programa R-Studio.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis de varianza de cada variable se resumen en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Cuadro de Análisis de la Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos y bioquímico medidos en plantas de *Eucalyptus nitens* generadas a partir de semillas irradiadas con diferentes dosis de radicación gamma. Valores significativos (***) resaltados en negrita ($\alpha = 0.05$). gl: grados de libertad, SC: Suma de Cuadrados, CM: Cuadrados medios.

Parámetro: Altura de plantas (cm)						
	gl	SC	CM	F	p-valor	Sig
Dosis	3	0,330	0,110	1,075	0,359	
Bloque	3	3,110	1,037	10,14	<0,001	***
Residuos	474	48,474	0,102			
Total	480	51,914				
Parámetro: DAC de plantas (cm)						
Dosis	3	1,06	0,353	0,599	0,616	
Bloque	3	26,93	8,976	15,217	<0,001	***
Error	474	279,59	0,590			
Total	480	307,58				
Parámetro: Volumen teórico (m3)						
Dosis	3	0,003	0,001	1,777	0,151	
Bloque	3	0,020	0,007	12,127	<0,001	***
Error	474	0,267	0,001			
Total	480	0,290				
Parámetro: Valores SPAD						
Dosis	3	346,4	115,47	5,591	0,001	***
Bloque	3	183,9	61,29	2,968	0,03	***
Error	153	3159,8	20,65			
Total						

Respecto a la variable altura (**Cuadro 4**), el mayor valor se reportó para la dosis G10, aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre las distintas dosis de irradiación. El modelo presenta un coeficiente de variación de 34,2%, y la comprobación de los supuestos arroja que los

residuos de esta variable se comportan de manera normal ($W = 0,99392$, $p\text{-value} = 0,05$), aunque no se cumple la homocedasticidad de las varianzas entre las distintas dosis probadas ($F = 3,48$, $p\text{-value} = 0,02$).

Las diferencias para la variable diámetro a la altura del cuello (**Cuadro 5**) tampoco son significativas entre las distintas dosis. El modelo presenta un coeficiente de variación de 35,19%, y la comprobación de los supuestos arroja que los residuos de esta variable se comportan de manera normal ($W = 0,99633$, $p\text{-value} = 0,336$), y que existe homocedasticidad de las varianzas entre las distintas dosis probadas ($F = 1,75$, $p\text{-value} = 0,155$).

Las diferencias para la variable volumen teórico DAC^2H (Cuadro 6) no son significativas entre las distintas dosis. El modelo presenta un coeficiente de variación de 92,76%, y la comprobación de los supuestos arroja que los residuos de esta variable no se comportan de manera normal ($W = 0,868$, $p\text{-value} = <0,001$), y que no existe homocedasticidad de las varianzas entre las distintas dosis probadas ($F = 6,31$, $p\text{-value} = <0,001$). Las diferencias en la prueba pos-hoc es un efecto de los outlier (**Figura 5**).

En relación al estado sanitario de las plantas, representado por la incidencia de daño por heladas, si se encontraron diferencias significativas asociadas a las diferentes dosis ensayadas (Chi cuadrado = 8,9566, $P\text{-value} = 0,003$, $df = 3$) (datos no presentados).

Los valores de SPAD (datos no presentados) mostraron diferencias significativas entre las dosis. El modelo presenta un coeficiente de variación de 6,27%, y la comprobación de los supuestos arrojó que los residuos de esta variable no se comportan de manera normal ($W = 0,9779$, $p\text{-value} = 0,01$), y que existe homocedasticidad de las varianzas entre las distintas dosis probadas ($F = 4,10$, $p\text{-value} = <0,250$). A partir de esto, se comprueba que existe una relación inversa entre las dosis y los valores de SPAD, teóricamente tomando como base la relación lineal positiva entre valores de SPAD y contenido de clorofila. Los tratamientos control G0 y G10 tienden a mostrar un mayor contenido de clorofila foliar, lo que se puede traducir en un mayor contenido de nitrógeno.

Por otro lado, los tratamientos G20 y G30 muestran una disminución en el valor SPAD, lo que teóricamente indica un decremento en el contenido de nitrógeno, atribuible a una baja concentración de clorofila foliar (Mendoza-Tafolla *et al.*, 2019), lo que generaría una disminución en las tasas fotosintéticas de los individuos, denotando déficit nutricional.

Es importante destacar que existen estudios en los que se evidencia que la precisión de las lecturas se ve influenciada por la hora del registro, temperatura ambiental, contenido de agua foliar, posición y zona de la hoja. Por lo mismo, es necesario realizar tomas de lecturas en diferentes estaciones y horarios; con el fin de aumentar la robustez de los modelos (Xiong *et al.*, 2015, De Lima *et al.*, 2014, Martínez & Guiamet, 2004).

Cuadro 4. Análisis de diferencias significativas para el carácter altura de plantas de plantas de *Eucalyptus nitens* viverizadas a partir de semillas irradiadas con distintas dosis de radicación gamma (Gy). Método LSD de Fisher. Grupos según probabilidad de diferencia de medias y $\alpha=0.05$.

Dosis	Altura (m)							Grupos Homogéneos
	Promedio	D.E	n	LCL	UCL	Min	Máx	
0 Gy	0,94	0,27	124	0,89	1,00	0,31	1,79	a
10 Gy	0,96	0,37	121	0,91	1,02	0,20	2,00	a
20 Gy	0,94	0,35	118	0,88	0,99	0,25	1,83	a
30 Gy	0,89	0,32	118	0,84	0,95	0,25	1,69	a

Cuadro 5. Análisis de diferencias significativas para el carácter diámetro a la altura del cuello o DAC de plantas de *Eucalyptus nitens* viverizadas a partir de semillas irradiadas con distintas dosis de radicación gamma (Gy). Método LSD de Fisher. Grupos según probabilidad de diferencia de medias y $\alpha=0.05$.

Dosis	Diámetro de cuello (cm)							Grupos Homogéneos
	Promedio	D.E	n	LCL	UCL	Min	Máx	
0 Gy	2,166	0,689	124	2,031	2,302	0,730	3,792	a
10 Gy	2,260	0,848	121	2,123	2,397	0,462	4,235	a
20 Gy	2,168	0,845	118	2,030	2,307	0,488	4,060	a
30 Gy	2,133	0,815	118	1,995	2,273	0,720	4,640	a

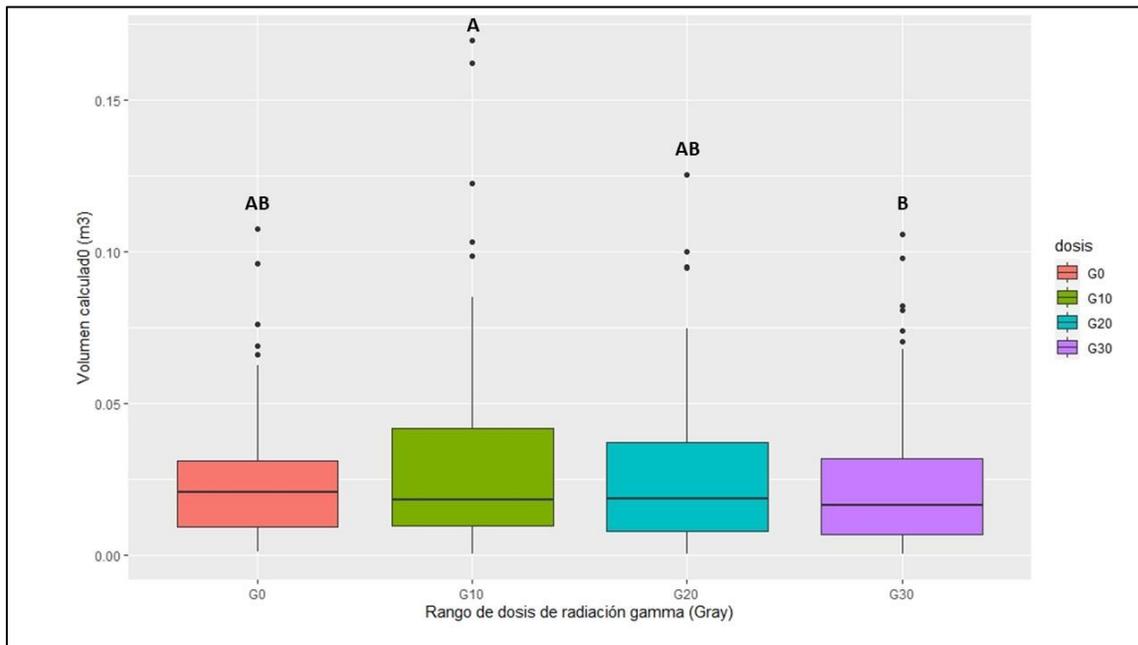


Figura 5. Boxplot para el parámetro morfológico: volumen teórico DAC²H (m³) en plantas de *Eucalyptus nitens* generadas a partir de semillas irradiadas con diferentes dosis de radicación gamma (Gy). Valores significativos resaltados en negrita ($\alpha = 0.05$), se muestran los valores para el valor teórico de biomasa en función de las 3 dosis + control (G0). Letras indican diferencias según Prueba de LSD Fisher DMS=0.08106 ($\alpha=0.05$).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Estudios anteriores concluyen que una dosis de 10 Gy de radiación gamma tiene un ligero efecto hormético sobre la capacidad de germinación de semillas de *E. nitens*, no así sobre la energía germinativa ni el periodo de energía; y que dosis de 20 a 50 Gy no exhiben diferencias respecto al testigo sin irradiar (Gutiérrez et al. (2021)). Puesto que *E. nitens* germina abundantemente (más del 90% en semillas testigo), su germinación no es una variable que necesite ser mejorada con mecanismos tan sofisticados, sin embargo, el constatar que la radiación gamma efectivamente puede mejorar la germinación, resulta un antecedente de interés para validar en qué medida la radiación pueda ser un tratamiento viable para especies con problemas de germinación y para evaluar también la extensión del efecto hormético sobre el desarrollo posterior de las plantas en terreno, tal como se ha hecho en el presente artículo. En este se entregan los primeros resultados del efecto de cuatro dosis de radiación

gamma (0, 10, 20 y 30 Gy) sobre el crecimiento inicial en altura, diámetro de cuello y DAC²H de plantas de *Eucalyptus nitens* durante el primer año de plantación.

En términos de crecimiento se observó diferencias (sin significación estadística) que favorecerían a la dosis 10 Gy respecto del testigo y de las dosis más altas. El mayor valor se reportó para la dosis G10 en todos los bloques, particularmente en el Bloque IV, en la parte alta de la ladera sin efecto de las heladas.

Se indica que la dosis de 10 Gy posiblemente pudiera mostrar diferencias significativas a mayor edad de las plantas, por lo cual se esperará hasta los 4 años de edad para sacar las conclusiones finales del ensayo y elaborar un protocolo de hormesis para *E. nitens*. Se propone repetir la experiencia usando semillas irradiadas con radiación gamma en dosis inferiores a 10 Gy (0- 0,5- 1- 2,5- 3 – 5- 7 -7,5- 9-10) que ya fueron obtenidas por ININ (México), con el objeto de mejorar los resultados en la germinación y el crecimiento inicial de las plantas de *E. nitens*.

Respecto a dosis inferiores a 10 Gy, existen antecedentes de que estas podrían ser más efectivas que dosis superiores, al menos en la estimulación de la germinación. En efecto, Iglesias-Andreu *et al.* (2012) mostraron un efecto radioestimulador significativo en la germinación de las semillas de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* tratados con dosis de radiación gamma menores a 10 Gy. El efecto radioestimulador más pronunciado en *P. hartwegii* fue el tratamiento de 2 Gy, que resultó en un alto porcentaje de germinación. Dosis de 5 Gy fue más eficaz para inducir un efecto similar en el abeto. Estos resultados son consistentes con el efecto radioestimulador observado por Rudolph (1979) para evaluar la germinación de semillas de *Pinus banksiana*. Análogamente, En *Pinus nigra*, Dudic (1961, cit. por Ferreira *et al.*, 1980) informa efectos significativos de radiación gama entre 0,88 y 8,88 Gy sobre la germinación y crecimiento de plántulas.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Verónica Emhart y al MSc. Alex Medina de Forestal Mininco (CMPC) por su disponibilidad para apoyar esta investigación. A nuestro técnico Sr. Hernán Soto, quien participó en el establecimiento y la medición del ensayo.

REFERENCIAS

- Cunha, A. R da, Katz, L, Sousa, A de P. & Martinez, R. (2015). Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *lisanthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *Idesia* (Arica), 33(2):97-105. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000200012>
- De Lima Vasconcelos, R., de Mello Prado, R., Reyes Hernández, A., & Caione, G. (2014). Efecto del horario de medición, posición y porción de la hoja en los índices de clorofila en la papa. *Idesia* (Arica), 32(4): 23-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000400004>
- Ferreira, C.; Franco do Nascimento, V.; Ferreira, M. & Vencovsky, R. (1980). Efeito de baixas doses de radiação gama na conservação do poder germinativo de sementes de *Araucaria angustifolia* (Bert). *IPEF* N° 21(dez 1980): 67-82.
- Gutiérrez, B., Koch, L., Villegas, D., Gonzalez, J., Ly, D., Molina, M., Rojas, P. & Velásquez, E. (2021). Análisis de Germinación de Semillas de *Eucalyptus nitens* Tratadas con Radiación Gamma: Indicios de Efecto Hormético. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(3): 7-16. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.554>
- Iglesias-Andreu, L.G., Octavio-Aguilar, P. & Bello-Bello, J. (2012). Current Importance and Potential use of low doses of gamma radiation in forest species. En: Adrovic, F. (Ed). *Gamma Radiation*. Publisher InTech. Capítulo 13. Pp: 263-280. <https://doi.org/10.5772/36950>
- Martínez, D.E. & Guiamet, J.J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24. <https://doi.org/10.1051/agro:2003060>

- Mendoza-Tafolla, R.O., Juarez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R.E., Sandoval-Villa, M., Iran, A.T. & Alejo-Santiago, G. (2019).** Estimating nitrogen and chlorophyll status of romaine lettuce using SPAD and at LEAF readings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(3): 751-756. <https://doi.org/10.15835/nbha47311525>
- Rudolph, T. (1979).** Effects of gamma irradiation of *Pinus banksiana* Lamb. Seed as expressed by M1 trees over a 10-year period. *Environmental and Experimental Botany*, N° 19. Pp: 85-91. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(79\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0098-8472(79)90012-1)
- Xiong, D., Chen, J., Yu, T., Gao, W., Ling, X., Li, Y., Peng, S. & Huang, J. (2015).** SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Sci Rep* 5, 13389. <https://doi.org/10.1038/srep13389>